

放水路内高濃度濁質進入現象の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS FOR HIGH TURBIDITY WATER FLOWING INTO DISCHARGE TUNNEL OF HYDRO-POWER PLANT

米山 望¹・田中伸和²・後藤孝臣³・本多 毅⁴

Nozomu YONEYAMA, Nobukazu TANAKA, Takaomi GOTO and Tsuyosi HONDA

¹正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所 (611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博(財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

³正会員 博(工) 中部電力(株) 越戸ダム管理所 (470-0328 豊田市勤八町中根 43-63)

⁴中部電力(株) 発電本部 土木建築部 技術・企画グループ (461-8680 名古屋東区東新町1番地)

It is purpose of this report to present a prediction method, which is developed to analyze behavior of high turbidity water flowing into a discharge tunnel of hydro-power plant. The features of this method are (1) to treat a density current by applying a numerical method for incompressible flow with density variation and (2) to apply turbidity area transportation equation and sediment transportation equation for turbidity behavior simulation. The prediction method is verified by comparison with a turbid water behavior flowing into a discharge tunnel in hydraulic model experiments. As a result, the computed flow velocity and the behavior of turbidity water agree well with experimental results.

Key Words : Numerical analysis, density flow, high turbid water, discharge tunnel, VOF method

1. はじめに

揚水発電所の下部ダム放水口と発電機をつなぐ放水路は、発電機に向かって下向きの勾配を持つことが多い。この場合、出水により大量の濁水が下部ダムに流入するとその一部が放水路内に進入し、濁質濃度が高い場合、数百 m 先にある発電機直下のドラフトまで到達することがある。大量の濁質がドラフト内に進入・堆積すると発電のため冷却水の確保が困難になり、発電機を使用できなくなる。このため、放水路内での高濃度濁質進入挙動を予測し、有効な対策を検討しておく必要がある。この進入挙動の特徴は、①濁水が清水で満たされた放水路内に清水との密度差のみを駆動力として進入すること、②濁水の進入に伴い、放水路内の清水が押し出されること、③進入濁水には様々な粒径を有する混合土砂が含まれることである。

この現象のような周囲より密度の高い流体が河床などの固定面に沿って移動する現象に関する研究は精力的に行われている。特に、上流からの連続的な濁質供給のない壁面サーマルの挙動に関する研究は多く行われており、最近の研究では、秋山ら¹⁾、衛藤ら²⁾などがある。一方、著者らは濁質濃度および水温の影響による貯水池水の密度変化が流れに与える影響を考慮した貯水池内三次元流

動予測手法を開発している³⁾。

著者らの方法を含めた従来の研究では、濁質の挙動を移流拡散方程式を用いて解析し十分な精度を持った結果を得ている。しかし、高濃度濁質進入現象に著者らの方法を適用したところ、後に示すように、濁質が実験結果と比較して大きく拡散した。本研究は数百メートルに渡って、放水路内を進行する現象の解析が目標であるため、拡散が大きいと、濁水先端の到達速度などの濁質挙動に大きな誤差が生じるため、何らかの改良が必要になっていた。

以下では、濁質挙動解析法の改良およびそれを含めた数値解析手法について説明したのち、その手法を貯水池と放水路を模擬した水理模型実験の濁質挙動に適用しその妥当性を検証する。

2. 数値シミュレーション手法の概要

(1) 濁質挙動の解析法

著者らは各計算セルごとに定義した濁質濃度 $C[mg/\ell]$ を次式の移流拡散方程式を用いて解析してきた³⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ C(u_j + w\delta_{3j}) - \left(\beta + \frac{\nu_t}{Pr_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right\} = 0 \quad (1)$$

ここに, $u_i[m/s]$:流速の各方向成分 ($i=3$ は鉛直方向を表す), $w[m/s]$:沈降速度, δ_{ij} :クロネッカーのデルタ, $\beta[m^2/s]$:清水中の濁質拡散係数, $\nu_t[m^2/s]$:渦動粘性係数, Pr_c :乱流シュミット数である.

上述したように, 上式 (1) を高濃度濁質進入現象に適用したところ実験結果を適切に再現できなかった. その原因として, この計算法では①濁質が短時間に清水中を拡散すること, ②濁質拡散が清水流によって抑制される現象を表現できないことが考えられる. このうち, ①は計算セル平均の濁質濃度を用いていることに起因している. すなわち, 清水で満たされた計算セル A に濁質が僅かでも流入するとセル全体に拡散した状態として取り扱われるため, 次の計算ステップにおいて計算セル A に隣接する清水セルに拡散していく. これを繰り返すことにより短い時間で濁質粒子が計算領域全体に拡散する. また, ②は移流拡散方程式が移流と拡散を別に評価しその結果を重ね合わせていることによる. このため, 濁水塊に向かう清水流が存在しても, 拡散項が流れとは無関係に評価されて濁質が清水流側に拡散する.

これらの問題に対応するため, ①計算セル平均濁質濃度 C の代わりに, 計算セル内の濁水領域占有率 F_C と計算セル内濁水領域占有率を基準とした濁質濃度 C_{F_c} を用い, さらに, ②移流と拡散を考慮した濁質移動速度 v_j を用いることで濁質挙動を適切に再現することを試みた. 具体的には以下のようにした.

ある計算セルについて, その体積を V , セル中の濁水領域の体積を V_C , セル中の濁質量を D とすると, F_C , C_{F_c} および C はそれぞれ

$$F_C = V_C/V, \quad C_{F_c} = D/V_C, \quad C = D/V$$

と表され, これらには次式の関係が成り立つ.

$$C = C_{F_c} \cdot F_C \quad (2)$$

また, 移動速度 v_j は関係式

$$C \cdot v_j \equiv C(u_j + w\delta_{3j}) - (\beta + \frac{\nu_t}{Pr_c}) \frac{\partial C}{\partial x_j} \quad (3)$$

を満たすとする. 式 (2) と式 (3) を式 (1) に代入し, C_{F_c} の式と F_c の式に分離すると, 以下の式が得られる.

$$\frac{\partial F_c}{\partial t} + \frac{\partial F_c v_j}{\partial x_j} = F_c \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{F_c}}{\partial t} + \frac{\partial C_{F_c} v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

本解析ではこの二式を用いて濁質挙動を解析する.

(2) 基礎方程式

a) 流れの基礎方程式

貯水池水の流動に関する基礎方程式³⁾を示す.

・質量保存方程式

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

・水温 \bar{T} (本解析では一定値) と濁質濃度 \bar{C} と貯水池水密度 $\bar{\rho}$ の関係式

$$\bar{\rho} = \rho_w(\bar{T}) + \left(1 - \frac{\rho_w(\bar{T})}{\rho_s}\right) \bar{C} \quad (7)$$

・清水の密度 ρ_w と水温の関係式

$$\rho_w(T) = 4.0704 \times 10^{-5} T^3 - 7.7617 \times 10^{-3} T^2 + 5.5301 \times 10^{-2} T + 999.91 \quad (8)$$

・運動方程式 ($i = 1, 2, 3$)

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j'' \right) \quad (9)$$

・水面形状の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (10)$$

・乱流エネルギー ($k \equiv \overline{\rho u_i' u_i'}/2\bar{\rho}$) 方程式

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} (\nu + \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \bar{\rho} (P_k - \varepsilon) \quad (11)$$

・乱流エネルギー散逸率 ($\varepsilon \equiv \nu \overline{\rho u_{i,j}' u_{i,j}'}/\bar{\rho}$) 方程式

$$\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\rho} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (12)$$

・渦動粘性係数

$$\nu_t = \begin{cases} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(1 - 0.1 \frac{g}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_3} \frac{k^2}{\varepsilon^2}\right)^{-1} & \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_3} \leq 0\right) \\ C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} & \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_3} > 0\right) \end{cases} \quad (13)$$

・粘性拡散項のモデル化式

$$\bar{\tau}_{ij} = \bar{\rho} \nu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \quad (14)$$

・レイノルズ応力のモデル化式

$$-\bar{\rho} \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j'' = \bar{\rho} \nu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{i,j} \quad (15)$$

・乱流エネルギーの生成項 P_k のモデル化式

$$P_k = -\bar{\rho} \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j'' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (16)$$

ここに, $\bar{\quad}$; レイノルズ平均, $\tilde{\quad}$; レイノルズ平均変動量, $\tilde{\quad}$; ファーブル平均, \quad'' ; ファーブル平均変動量を表し, $G_i[m/s^2]$; 単位体積あたり外力の各方向成分, $\nu[m^2/s]$; 動粘性係数, F ; 計算セル内の貯水池水存在率 ($0 \leq F \leq 1$), $\sigma_\varepsilon=1.3, C_{\varepsilon 1}=1.45, C_{\varepsilon 2}=1.92, C_\mu=0.09$ としている.

b) 濁質挙動の基礎方程式

粒径による挙動の違いを考慮するため、濁水を粒径により分類した粒径別濁水塊 $m(m = 1, n_d)$ の重ね合わせとして解析する。 n_d は粒径別濁水塊の個数とする。基礎方程式を以下に示す。

・粒径別濁水塊 m における濁水領域移流拡散方程式

$$\frac{\partial F_c^m}{\partial t} + \frac{\partial F_c^m v_j^m}{\partial x_j} = F_c \frac{\partial v_j^m}{\partial x_j} \quad (17)$$

・粒径別濁水塊 m における濁質移動方程式

$$\frac{\partial \overline{C}_{F_c}^m}{\partial t} + \frac{\partial \overline{C}_{F_c}^m v_j^m}{\partial x_j} = 0 \quad (18)$$

ここで、

$$v_j^m \equiv \tilde{u}_j + w^m \delta_{3j} - \frac{1}{C_m} \left(\beta + \frac{\nu_t}{Pr_c} \right) \frac{\partial \overline{C}^m}{\partial x_j} \quad (19)$$

であり

$$w^m = \begin{cases} -\frac{g}{18\nu} \frac{\rho_s - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \cdot (d^m)^2 & \left(\frac{w^m d^m}{\nu} \leq 1 \right) \\ -0.223\nu^{\frac{1}{3}} [(\rho_s - \bar{\rho})\bar{\rho}g]^{\frac{2}{3}} d^m & \left(\frac{w^m d^m}{\nu} > 1 \right) \end{cases} \quad (20)$$

である。なお、粒径別濁水塊 m の濁質濃度 \overline{C}^m および濁水領域占有率 F_c^m は、次式により合成した濁質濃度 \overline{C} および濁水領域占有率 F_c に関連づけられる。

$$\overline{C} = \sum_{m=1}^{n_d} \overline{C}^m \quad (21)$$

$$F_c = \max \{ F_c^m, (m = 1, n_d) \} \quad (22)$$

(3) 解析方法

解析には直交直線座標を用い、流速はスタッガード配置、それ以外の物理量はセル中央に配置した。基礎方程式の離散化については時間項を一次精度の前進差分、移流項を三次精度の風上差分、拡散項を二次精度の中央差分とした。

水面の解析は式 (10) を用いて VOF 法³⁾により解析した。濁質挙動のうち、濁水領域は式 (17) を用いて VOF 法と同様の手順で解析した。水面解析の VOF 法と異なる点は、領域の拡大・縮小を伴うことおよび水面のように厳格に境界面を定める必要がないことである。また、濁質の移動は基本的に濁水領域の移動と連動させた。ただし、式 (17) と式 (18) の右辺の違いにより、濁水領域が拡大・縮小しても濁質量は不変である。

また、底面への濁質の堆積を以下の手順で評価した。

- (i) 限界掃流力に関する岩垣公式⁴⁾より、底面に接しているセル C_b での掃流限界摩擦速度 u_{*c} を求め、対数則によりそれに相当する移動限界流速 u_c を求める
- (ii) 計算で求めたセル C_b の底面に平行な流速成分 u_b を移動限界流速 u_c と比較し、 u_b が大きければ堆積しない。 u_b が小さければ次に進む。
- (iii) セル C_b での沈降速度 w および鉛直方向乱れ速度強度 $\sqrt{u_3'^2}$ ($= \sqrt{u_3'^2}$ とする) を算定する。

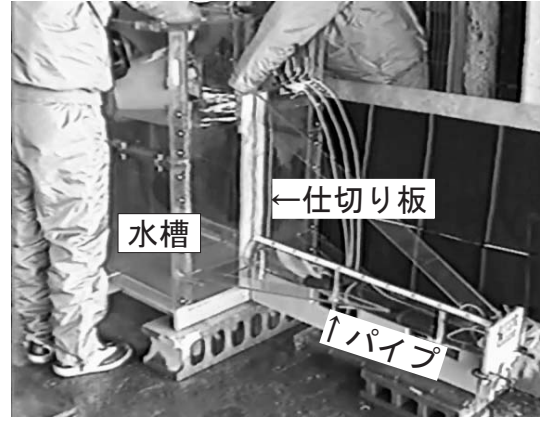


図-1 実験模型の外観

- (iv) 沈降速度 w が鉛直方向乱れ速度強度 $\sqrt{u_3'^2}$ より小さければ堆積しない。大きければ沈降速度 w に従って堆積させ、計算セルから濁質を取り除く。

(4) 計算の流れ

本解析の質量保存式 (6) に密度項が含まれているが、圧力が密度変化に影響を及ぼさないため、非圧縮性流体解析の計算法を用いる。計算の流れを以下に示す。

- (i) 時刻 t ですべての物理量の値が既知とする。
- (ii) Δt 後の水面形状 (F) を算定する。
- (iii) すべての濁水領域 ($m = 1, n_d$) について、 Δt 後の濁水領域形状 (F_c^m)、濁水領域濃度 $\overline{C}_{F_c}^m$ を算定し、式 (21) から Δt 後の濁質濃度 \overline{C} を求める。
- (iv) Δt 後の濁質濃度 \overline{C} から貯水池水の密度 $\bar{\rho}$ を求める。
- (v) Δt 後の渦動粘性係数 ν_t 、乱流エネルギー k および乱流エネルギー散逸率 ε を求める。
- (vi) SIMPLE 法に基づき、 Δt 後の流速 \tilde{u}_i 、圧力 \bar{p} を求めて、(ii) に進む。

3. 数値シミュレーションによる現象の再現

(1) 水理模型実験の概要

実験模型の外観を図-1、寸法を図-2に示す。模型は、貯水池を模擬した水槽に放水路を模擬したパイプを接続した形状である。水槽とパイプの境界の水槽側に取り外し可能な仕切り板を設置した。

水槽にパイプを水平に接続した形状を模型 A、放水路の下り勾配を考慮して、パイプを下向きに 4.4 % 傾斜させ水平な水槽に接続した形状を模型 B、さらに模型 A 全体を 5 % 傾斜させた形状を模型 C とする。

また、パイプ内にパイプの上半分を閉塞させる半円形の板（以下、上部閉塞板とする）をパイプの中心線に対し垂直に設置し、放水路を一部閉塞させた場合の挙動変化も検討した。上部閉塞板の設置は放水路への濁質進入抑制策案の一つとして検討している。その設置位置は、

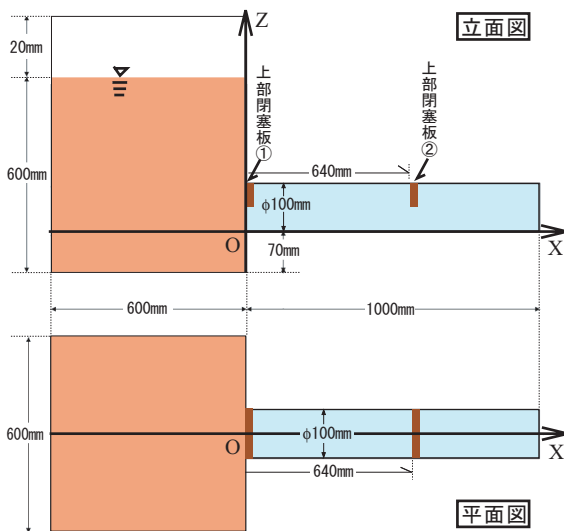


図-2 実験模型形状 (模型 A)

表-1 実験 1 の実験条件と進入速度

実験 No.	模型形状	上部閉塞板	C_0 g/l	水温	進入速度 cm/s
1-1	A	なし	0.65	12.9	0.52
1-2	A	なし	6.7	13.9	2.94
1-3	B	なし	1.8	14.9	1.23
1-4	B	なし	3.0	12.6	2.38
1-5	B	なし	3.5	12.6	2.22

表-2 実験 2 の実験条件と進入速度

実験 No.	模型形状	上部閉塞板設置位置	C_0 g/l	進入速度 cm/s
2-1	A	なし	2.8	1.61
2-2	A	②のみ	2.8	1.54
2-3	A	①のみ	3.1	1.16
2-4	A	①②	3.0	1.40
2-5	C	なし	3.0	2.12
2-6	C	②のみ	3.2	1.89
2-7	C	①のみ	3.1	1.82
2-8	C	①②	3.1	1.61

図-2 に示した上部閉塞板①および②の位置とした。

実験は平成 13 年 1 月 (実験 1) および平成 14 年 4 月 (実験 2) の二回実施し、模型形状、水槽内初期濁質濃度 C_0 [g/l]、上部閉塞板の設置位置を変化させて、仕切り板が取り除かれた後の濁質挙動をビデオ撮影した。各実験では、まず水槽に濁質を投入して均一になるまで攪拌し、初期濁質濃度、粒度分布を測定するために濁水を採取したあと、直ちに仕切り板を取り除いた。実験 1 の実験条件を表-1 に示す。同表中の進入速度 cm/s は、パイプ長

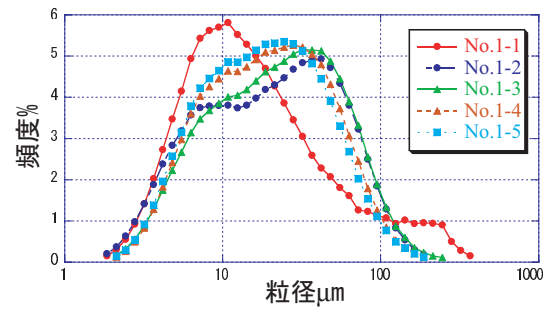


図-3 実験 1 での水槽内初期粒度分布

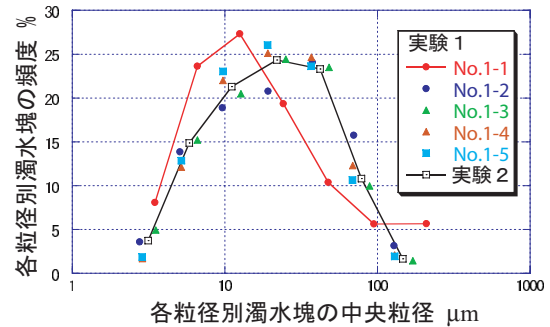


図-4 粒径別濁水塊の中央粒径と頻度

(100cm) を仕切り板除去から濁水先端がパイプ終端に到達するまでの経過時間 [s] で除したものである。実験 2 では、水槽内初期濁質濃度 C_0 を同程度とし、上部閉塞板の位置を変化させた。実験条件と進入速度を表-2 に示す。実験 2 での水温は各ケースとも約 20 である。

濁水の作成には中部電力管内の揚水発電所ダム貯水池内の堆積土砂を用いた。図-3 に実験 1 で計測した水槽内初期粒度分布を示す。実験 2 では水槽内濁質の粒度分布を測定していないが、実験 1 と同じ堆積土砂を用いた。

(2) 解析条件

実験観察結果からパイプ内における現象の三次元性は小さいことが判明したため、鉛直上向きを Z 軸正とし、パイプ中心軸を含む鉛直二次元解析を実施した。解析は、図-2 の立面図に示された座標系を用いて水面を含む水槽およびパイプ部を対象にした。模型 B、模型 C の解析では、座標系を固定して、パイプ部または模型全体を原点を基準に回転させた。この際、計算セル内に計算境界が階段状になるのを防ぐため、境界近傍の計算では各計算セルに空隙率、セル境界に開口率を設定して基礎方程式を離散化した式を用いた⁵⁾。また、水温は一定とした。また、メッシュの刻みは現地形状へ適用性を考慮して、パイプ径の 10 分の 1 (1cm) とした。

解析では、濁水を図-3 の水槽内初期粒度分布を基に分類した 7 つの粒径別濁水塊を用いた。図-4 に実験ケース別に粒径別濁水塊の中央粒径と濁水全体における粒径別濁水塊の頻度 (占有率) を示す。同図には、実験 2 (No.2-1 ~ 2-8) を対象とした解析に用いた粒径別濁水塊についても同様に表示した。前述のように実験 2 では粒度分布

を測定していないが、同じ貯水池の土砂を用いているため、実験1のNo.1-2～1-5までの粒度の頻度の平均値から粒度分布を推定した。

壁面流速境界条件は、実験での濁水の進入先端の多くは壁面近傍が尖った形になっているため、Free-Slip条件とした。ただし、進入速度が遅い実験ケースの解析では、壁面の影響も無視できないため Non-Slip 条件の解析も併せて行った。

(3) 解析結果の検証

水理模型実験結果との比較により本研究の解析法の妥当性を検証する。濁質挙動に式(17)と式(18)を適用した本研究の解析法(TEMとする)と、式(1)を用いて粒径別濁水塊ごとに解析する手法(SEMとする)の両方の解析を実施した。

a) 濁質進入挙動の比較

No.1-2を対象に解析した結果を図-5に、上部閉塞板があるNo.2-8を対象に解析した結果を図-6に示す。両図ではSEMの解析結果は \bar{C} をメッシュごとに表示し、TEMの解析結果は、式(22)に基づいて合成した濁水領域 F_C 内に、合成された濁水領域基準の濁質濃度 \bar{C}/F_C を表示した。また、流速ベクトルの向きも重ねて表示した。図中の時間は、仕切り板が取り除かれてからの経過時間であり、濁水先端が実験結果とほぼ同じ位置に達したTEMの解析結果を選定して実験結果と比較し、実験、TEMそれぞれの経過時間を表示した。SEMについては、TEMの解析結果と同じ経過時間の解析結果を表示した。なお、実験結果の濁水界面は、光が当たって明るく(白く)写っている部分である。

図-5から、TEMは濁水がはじめパイプ下半分に流入し、清水を押しだしながらパイプ全体に進入している実験での挙動を時間経過を含め適切に再現できていること、SEMでは清水の動きに関わらずに濁質が拡散し、清水流がパイプから流出している水槽接続部の上半分でも濁質が拡散しており、清水流が濁質拡散を抑制できていないことがわかる。

つぎに、図-6から、パイプ内の上部閉塞板②を通過する際に、一部の濁質進入が同閉塞板に遮られる様子(実験47秒)や、パイプ終端に到達した濁質が戻る様子など実験の濁質挙動を、経過時間を含め結果を適切に再現している。なお、解析62秒や解析86秒の比較では、実験結果で濁質濃度が小さい領域において、TEM解析結果の濁質分布が一部不連続になっている。これは、解析に用いた粒径別濁水塊の中央粒径のうちの最小の中央粒径より細かい粒子の挙動については十分解析できないことによると考えられる。

一方、SEMの解析結果は、実験結果に比べて拡散が大きいことや時間的に遅いことだけでなく、113秒などのパイプ終端近傍の濁質濃度をTEMと比較すると分かるように、SEMではパイプ内上部閉塞板②より先には

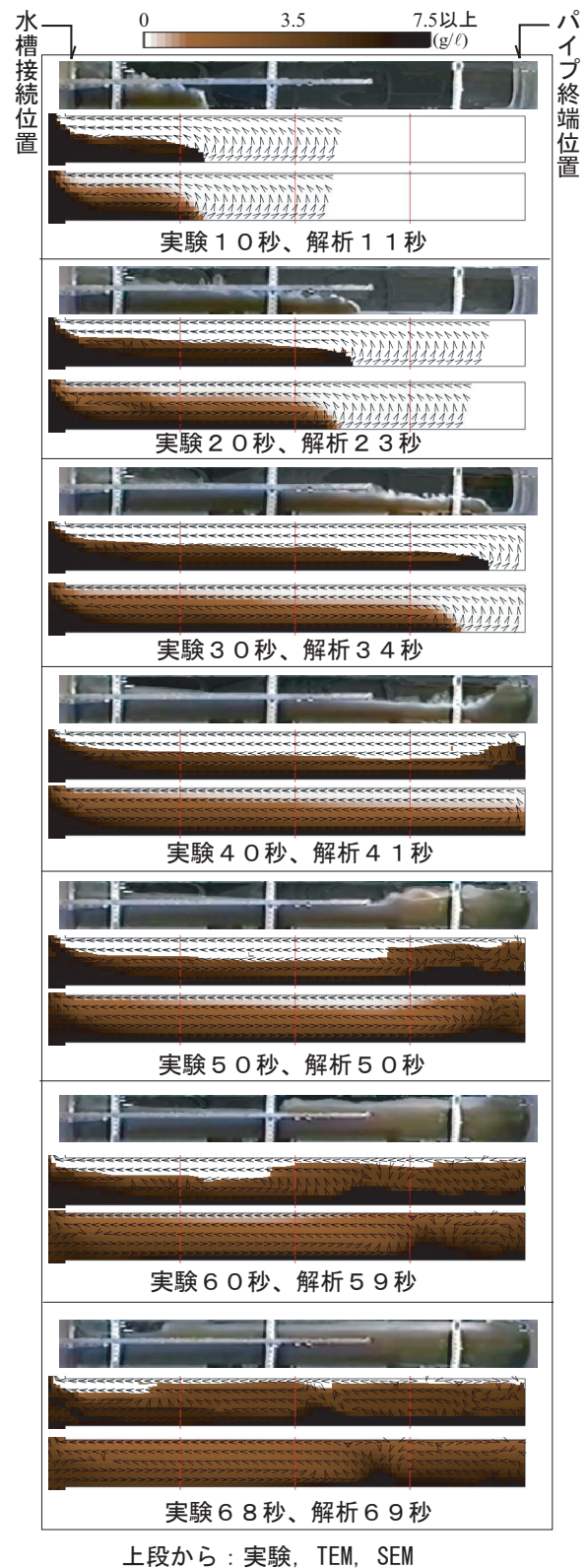


図-5 実験 No.1-2 と解析結果の比較

高濃度濁質が到達していないことがわかる。

b) 濁質進入速度の比較

次に、全実験ケースを対象に進入速度を比較した結果を図-7に示す。同図にはTEMの解析結果を基準にして進入速度の速い結果を上から並べて表示した。

実験結果とTEMの解析結果との比較からTEMの

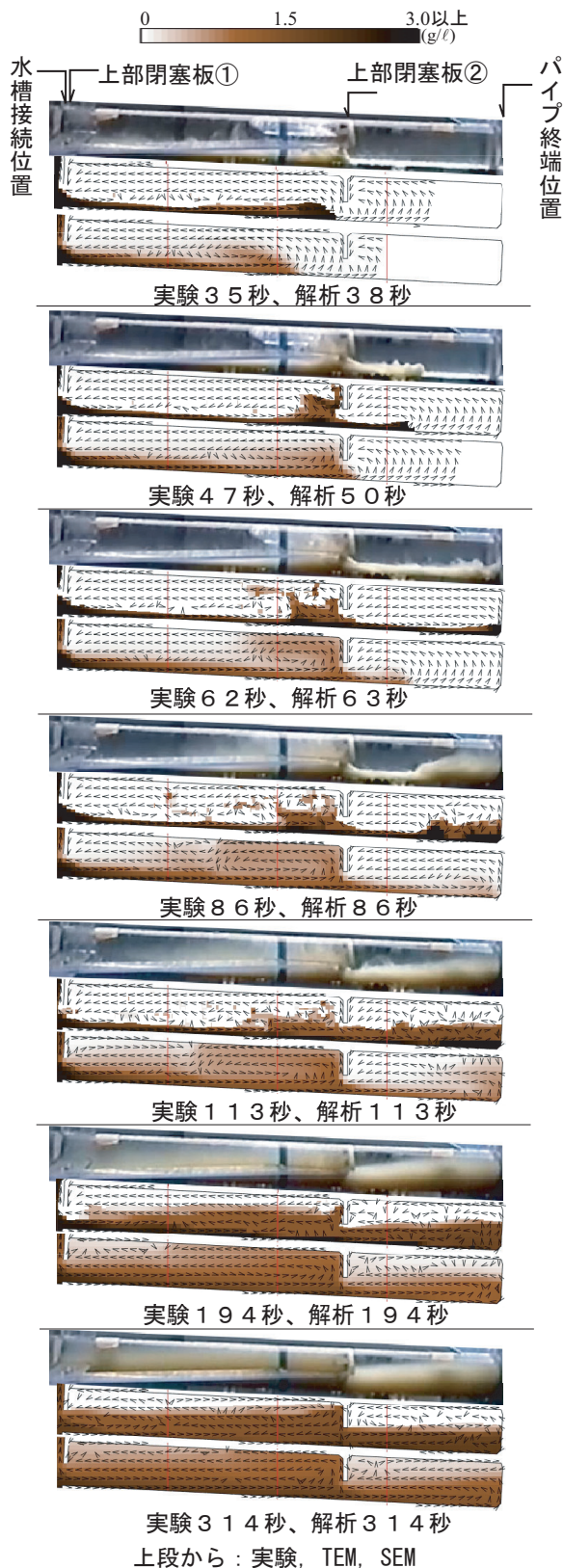


図-6 実験 No.2-8 と解析結果の比較

解析結果は実験結果とよく一致したこと、境界条件の選択では、進入速度の遅い No.1-1 は Non-Slip, その他のケース（進入速度がおおむね 1cm/s 以上）では、Free-Slip にすることで進入速度の実験結果を精度よく再現できることがわかった。

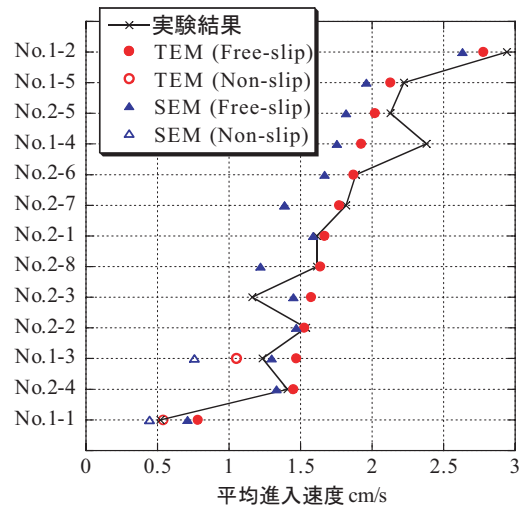


図-7 濁質進入速度の比較

また、TEM と SEM の比較から、全体的に SEM の進入速度は TEM よりも遅いこと、特に、上部閉塞板により濁水流入量が抑えられて濁質の拡散余地（清水領域）が大きな場合に、TEM と SEM との進入速度の差が大きいことがわかった。

4. おわりに

本研究で得られた成果は以下のように纏められる。

- 放水路内への高濃度濁質進入現象を予測するため、濁水領域移流拡散方程式および濁質移動方程式を用いて濁質挙動を予測する手法を構築した。
- 構築した手法を実験結果と比較したところ、濁質進入挙動や進入速度を適切に再現し、高濃度濁質進入現象の予測に適用可能であることがわかった
- 濁質挙動解析に濁質濃度の移流拡散方程式のみ用いた場合には実験結果を十分再現できないことがわかり、本研究で構築した手法の有効性が確認された。

今後は、本研究で構築した解析手法を実際の放水路形状に適用して、濁質進入を防ぐための対策法について検討を行う。

参考文献

- 1) 秋山壽一郎・重枝未玲・前多陽子：3次元モデルによる水平面上の粒子サーマルの流動・堆積シミュレーション、水工学論文集、第48巻、pp1165-1170、2004。
- 2) 衛藤俊彦・福島祐介：保存性・非保存性傾斜サーマルの流動特性に及ぼすスケールの効果、水工学論文集、第48巻、pp1171-1176、2004。
- 3) 米山望、井上素行：三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法、土木学会論文集、No.684/II-56、pp.127-140、2001。
- 4) 土木学会水理委員会：水理公式集 [平成11年度版]、1999。
- 5) 米山望、松山昌史：自由液面解析コード (FRESH-FV) を用いた津波遡上解析、海岸工学論文集、第44巻、pp.266-270、1997。

(2005.9.30 受付)